

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГРОЗАХ МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РАЗРЯДАМИ

Б. Д. Христофоров

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, khrist@idg.chph.ras.ru

Рассмотрены условия применения электрических разрядов для лабораторного моделирования газодинамических процессов при грозах. Разработаны методы экспериментального моделирования молнии и грома разрядом конденсаторных батарей. Критерии моделирования получены из общих уравнений, определяющих модельные и натурные процессы. Приведены результаты измерения параметров канала и ударной волны при мощных электрических разрядах в модельных опытах. Дано сравнение опытных данных с расчетами действия взрыва по разным методикам. Определены тротиловые эквиваленты электрических разрядов, моделирующих грозовые явления. Оценены энергия, выделившаяся в молнии, при обработке ее фотографий, параметры ударных волн в ближней зоне и звуковых возмущений на больших расстояниях в воздухе и грунте.

Ключевые слова: молния, гром, моделирование, электрический разряд, взрыв.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным [1–3] ежегодно на Земле происходит свыше 30 млрд грозовых разрядов, которые возникают внутри грозовых облаков, между облаками и реже между облаком и землей или ионосферой. Электрическая энергия в грозовом облаке может достигать $10^{10} \div 10^{11}$ Дж, а в каждой молнии длительностью до 0.1 с выделяется энергия $10^7 \div 10^{10}$ Дж. При ударе молнии в землю разряд происходит в полях напряженностью ≈ 3 кВ/см, что на порядок меньше напряженности пробойного поля для воздуха. Сначала идет лидер с током ≈ 100 А, потом от земли идет обратный разряд. Эта главная стадия молнии с током до 100 кА, температурой $T \approx (30 \div 25) \cdot 10^3$ К и скоростью $0.1 \div 0.3$ от скорости света вызывает ударную волну (УВ), действие которой сопровождается громовыми раскатами. Посредством гроз реализуется взаимодействие верхних и нижних геосфер Земли путем обмена запасенной в них механической и электрической энергии. Поэтому полезны модельные исследования этого процесса, позволяющие получать его количественные оценки.

В работе предложены методы экспериментального моделирования молнии и грома разрядом конденсаторных батарей и критерии моделирования, полученные из определяющих модельных и натурных процессов уравнений магнитной газовой динамики [1]. По данным модельных экспериментов определены параметры импульсов электрического тока, разрядной

плазмы и УВ в воздухе, тротиловые эквиваленты электрических разрядов, проведены оценки энергии, выделившейся в молнии, путем обработки ее фотографий, а также параметров звуковых возмущений на больших расстояниях в воздухе и грунте.

КРИТЕРИИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе анализа уравнений магнитной газовой динамики предложены следующие безразмерные критерии моделирования молнии и грома электрическим разрядом конденсатора: $\pi = p_m/p_0$, $\lambda = R/(E/p_0)^{1/3}$, $cI/p_0(E/p_0)^{1/3}$, $c\tau/(E/p_0)^{1/3}$, L/R . Размерный критерий j^2/σ определяет равенство удельной электрической мощности в молнии и разряде. Здесь p_m/p_0 — отношение максимального давления УВ к атмосферному, E — энергия, выделившаяся в разряде или молнии, I , τ — удельный импульс и длительность положительной фазы УВ, c — скорость звука, L , R — длина разряда и расстояние до него, j — плотность тока, σ — проводимость плазмы.

Использованная система уравнений магнитной газовой динамики имеет вид:

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0; \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \cdot \mathbf{B}); \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H};$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0; \quad p = p(\rho, e);$$

$$\frac{\rho \partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mathbf{F}_n; \quad \frac{\rho de}{dt} - \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{j^2}{\sigma}.$$

Таблица 1
 Параметры конденсаторной батареи
 и импульса тока

C/C_0	U_m , кВ	i_m , кА	$CU^2/2$, кДж	E , кДж	t_0 , мкс	$E/(CU^2/2)$
1	4.6	167	137.5	73	330	0.53
0.5	3.5	165	39.8	26.7	200	0.67
0.25	4.0	142	26	16.5	134	0.64

Здесь E и H — напряженности электрического и магнитного полей, u — массовая скорость, μ — магнитная проницаемость, $e = e(p, \rho)$ — уравнение состояния, e — внутренняя энергия, ρ — плотность, $F_n = j \cdot B$ — пондеромоторная сила на единицу объема.

В модельных исследованиях применялась батарея конденсаторов, выбранная по критериям моделирования с максимальной емкостью $C_0 = 13000$ мкФ, напряжением $U_0 = 5$ кВ, запасаемой энергией $C_0 U_0^2 / 2 = 160$ кДж, и три характерных режима разряда, приведенные в табл. 1, позволяющие уменьшать энергию E путем снижения емкости C и напряжения U . При разряде конденсаторной батареи через плоский проводник из алюминиевой фольги возникал электрический взрыв, который имитировал световую вспышку молнии и возбуждал УВ.

На рис. 1,а приведены временные зависимости напряжения и тока в разряде, а на рис. 1,б — давления УВ в воздухе. Для измерения тока i , напряжения U , длительности разряда t_0 и электрической энергии E , выделившейся в разряде, применялись пояс Роговского и делитель напряжения, для измерения параметров плазмы и УВ — высокоскоростная фотосъемка, пьезоэлектрические датчики и импульсомеры.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 в безразмерных переменных показаны результаты измерения и расчетов приращения максимального давления $\Delta p = (p_m - p_0)/p_0$ и удельного импульса в УВ при разрядах $I/E^{1/3}$ от приведенного расстояния $\lambda = R/(E/p_0)^{1/3}$. Представлены результаты расчетов для взрыва горячей сферы [4] и для взрыва сферического заряда тротила по формулам Садовского [5, 6]:

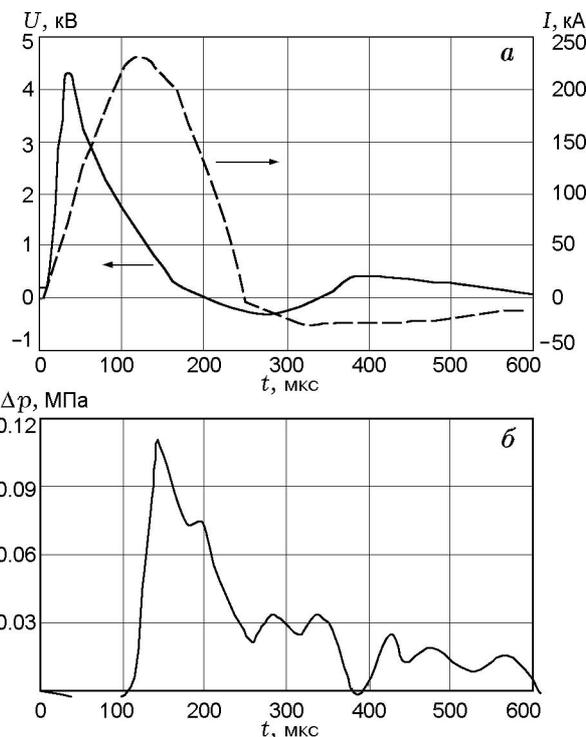


Рис. 1. Экспериментальные зависимости напряжения и тока разряда (а) и приращения давления в УВ при электрическом разряде (б) от времени

$$\Delta p_m = \frac{0.084}{R/G^{1/3}} + \frac{0.27}{(R/G^{1/3})^2} + \frac{0.695}{(R/G^{1/3})^3}, \quad (1)$$

$$I = \frac{184(G^{2/3})}{R},$$

где Δp_m выражено в МПа, I — в Па·с, расстояние R — в м, масса тротила G — в кг, $R/G^{1/3} = 3.47\lambda = 3.47R/(E/p_0)^{1/3}$. Энергия E взрыва 1 кг тротила принята равной 4.2 МДж.

Сравнением результатов измерений с расчетами по формулам Садовского (1) получены средние значения тротилового эквивалента разряда $T\Theta = 0.27$ и 0.34 для максимального давления и импульса соответственно, а при сравнении с расчетами [4], совпавшими с опытными данными, — $T\Theta = 1$.

В табл. 2 приведены измеренные температуры разряда при разной его энергии, характерной для молнии. Определенное по скорости расширения разряда давление в УВ и плазме $\Delta p \approx 5$ МПа заметно меньше, чем при взрыве тротила, из-за большего времени выделения энергии. Это согласуется с полученными ранее

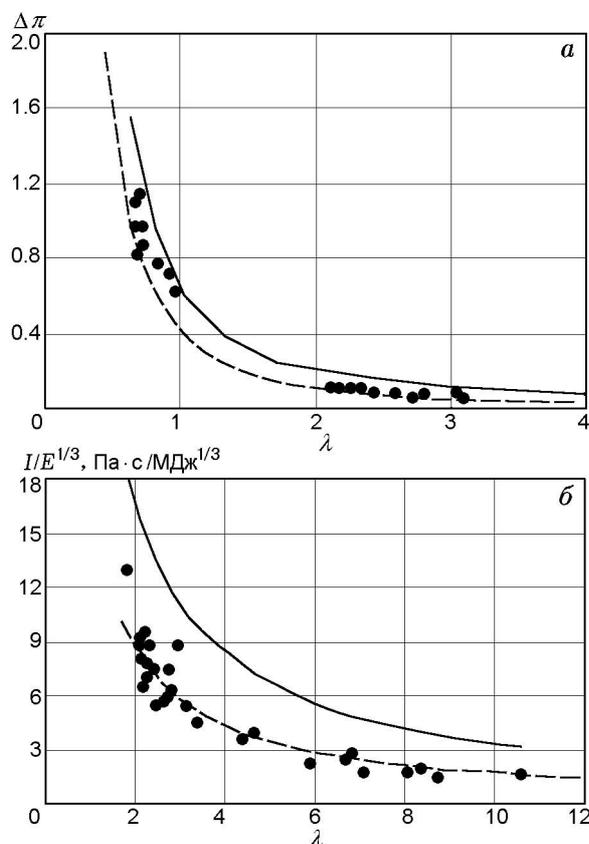


Рис. 2. Зависимости приращения максимального безразмерного давления $\Delta\pi$ (а) и приведенного импульса $I/E^{1/3}$ (б) в УВ при электрическом разряде от безразмерного расстояния λ :

сплошные кривые — расчеты по формулам Садовского (1) для взрыва тротила, штриховые — взрыв горячей сферы [4], точки — эксперимент

Таблица 2
Зависимость температуры плазмы в разряде от его энергии

E , кДж	T , 10^3 К
35	21
27	19.5
19	20
14	18

данными о влиянии свойств источника на действии взрыва [7].

Приведенные данные модельных измерений при выбранных условиях моделирования соответствуют параметрам молнии и грома [1–3]. Лидеру с током ≈ 100 А при грозе от-

вечает стадия прогрева проводника до начала электрического взрыва. Токи величиной ≈ 100 кА при электрическом взрыве в разряде соответствуют 2-й стадии молнии, когда пробой с высокой скоростью распространяется назад к облаку, выделяется основная энергия и образуется УВ. Температура разрядной плазмы в табл. 2 и температура молнии соответствуют друг другу при близких значениях удельной мощности j^2/σ в модели и натуре. Характерные длительности разряда и УВ $1 \text{ мс}/\text{МДж}^{1/3}$ при моделировании близки к длительности грома и молнии.

Основные погрешности моделирования связаны с отличием параметра L/R в модели и натуре вследствие цилиндрической симметрии молнии. Однако это не мешает определять параметры канала молнии при известной поглощенной удельной мощности j^2/σ и параметры УВ по заданной энергии.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ МОЛНИИ ПО ЕЕ ФОТОГРАФИИ

В настоящее время имеется большое количество опубликованных фотографий молний. Согласно [3] диаметр проводящего канала молнии с температурой ≈ 3000 К составляет около 0.1 м. На рис. 3 приведена фотография завершающей стадии развития молнии (когда пробой шел в обратную сторону) [8].

Указанный на фотографии масштаб позволил оценить для цилиндрической симметрии объем ($V_1 = \pi R_1^2 h = 3.8 \text{ м}^3$) и средний радиус ($R_1 = 1.1$ м) участка молнии высотой $h = 1$ м. Для определения энергии молнии объем V_1 ее участка высотой 1 м на фотографии сравнивался с ограниченным изотермой $T/T_0 = 10$ ($T_0 = 300$ К) равным объемом продуктов взрыва эквивалентной горячей сферы радиусом $R_2 = (V_1/4.18)^{1/3} = (3.8/4.18)^{1/3} = 0.97$ м из расчета [4]. Предполагалось, что на фотографии видна область с температурой свыше 3000 К.

На рис. 4 приведена рассчитанная зависимость приведенного объема V/E от приведенного времени $t/E^{1/3}$ для изотермы $T/T_0 = 10$ при взрыве горячей сферы из [4], крестиком на графике обозначен приведенный эквивалентный объем молнии $V_1/E = 0.8 \text{ м}^3/\text{МДж}$, принятый равным максимальному объему, ограниченному изотермой. Удельная энергия молнии $E = V_1/(V_1/E) = 3.8/0.8 = 4.75 \text{ МДж/м}$. Время от начала разряда $t = 2.08$ мс. Молния с

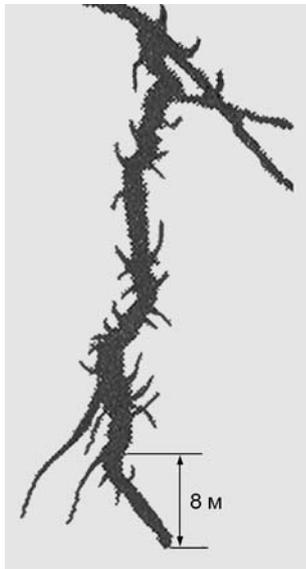


Рис. 3. Фрагмент фотографии молнии с экспозицией 13.5 мкс [8]

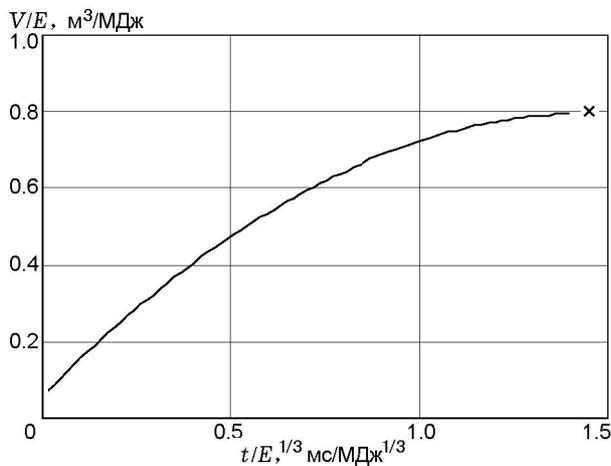


Рис. 4. Зависимость приведенного объема, ограниченного изотермой $T/T_0 = 10$, от приведенного времени для горячей сферы из [4]:
 × — приведенный эквивалентный объем молнии $V_1/E = 0.8 \text{ м}^3/\text{МДж}$

характерной длиной 4 км будет иметь энергию $E = 4.75 \cdot 4000 = 19000 \text{ МДж}$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УВ ПРИ ГРОЗАХ ПО ДАННЫМ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 5 показаны зависимости параметров УВ от расстояния в воздухе при пробое с

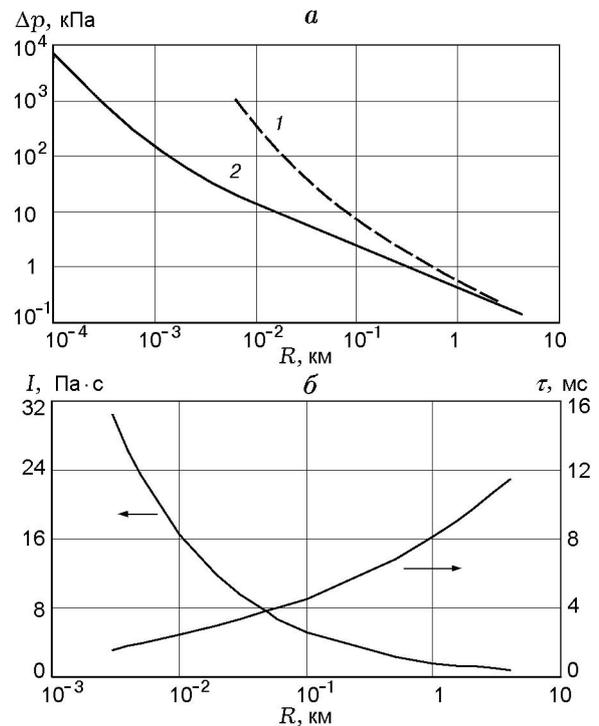


Рис. 5. Зависимости приращения максимального давления, удельного импульса и длительности положительной фазы в УВ от расстояния по нормали к центру молнии длиной $L = 4 \text{ км}$ при выделившейся энергии $E = 4200 \text{ МДж}$:

а: 1 — расчет по формуле (1), 2 — расчеты методом [4] и по формуле (2), которые совпали; *б* — расчеты по формулам (2)

энергией $E = 4200 \text{ МДж}$ (1000 кг тротила) между двумя облаками, рассчитанные методом [4], по формуле Садовского (1) для сферического взрыва и по нижеприведенным формулам (2) для цилиндрического взрыва тротила. Эмпирические формулы (2) получены в работе [9] в диапазоне $0.035 < \Delta p_m < 2.35 \text{ МПа}$, при этом принималось $T\Theta = 0.27$ и $G = 270 \text{ кг}$:

$$\Delta p_m = 1.02 \frac{q}{R^2} + 0.2 \frac{q^{3/8}}{R^{3/4}}, \quad I = 397 \frac{q^{3/4}}{R^{1/2}}. \quad (2)$$

Здесь R выражено в м, Δp_m — в МПа, I — в Па·с, $q = 0.0675 \text{ кг/м}$ — удельная масса тротила при длине заряда $L = 4 \text{ км}$. При $p < 10 \text{ кПа}$ расчеты проводились аппроксимацией формул (1) и (2).

Расчеты для взрыва сферы [4] представлены в виде зависимостей параметров УВ от объема. Предполагалось, что для сферического и цилиндрического взрывов параметры УВ — одинаковые функции ее объема.

ОЦЕНКИ ЗВУКОВЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ГРОЗАХ

Для оценки параметров звуковых возмущений на больших расстояниях при $\Delta p_m \leq 10$ кПа, где использование формул (1), (2) некорректно, применялись асимптотические формулы для сферического взрыва тротила [5]:

$$\Delta p_m = 179/(R/G^{1/3})(Ln(R/G^{1/3}))^{1/2},$$

$$I = 184(G^{2/3})/R, \quad \tau = 2I/\Delta p_m, \quad (3)$$

где Δp — в кПа, I — в Па·с, R — в м, G — в кг. Оценки параметров звуковых возмущений у земли при пробое между двумя облаками на высоте 4 км с энергией $E = 4200$ МДж, выполненные по формулам (3) при $R = 4000$ м, $G = 270$ кг, составили: $\Delta p_m = 114$ Па, $I = 1.91$ Па·с.

При наземных измерениях звуковых и сейсмических сигналов при грозах обычно полоса пропускаемых частот измерительной аппаратуры $f \leq 20$ Гц. В приведенных выше оценках временной профиль волны в расчетах считался треугольным, учитывалось удвоение амплитуды давления Δp_m при отражении от земли и «завал» ее фронта измерительным трактом, тогда

$$\Delta p(t) = 2\Delta p_m(1 - t/\tau)(1 - \exp(-2\pi ft)). \quad (4)$$

Фильтр практически не искажает УВ при ее длительности $\tau = 33.5$ мс.

Максимальное давление в грунте Δp_{m1} определялось из формулы (4): $\Delta p_{m1} = 228$ Па. Амплитуды скорости сейсмических колебаний при грозе оценивались по формуле $u_m = 2\Delta p_m/c\rho$ при скорости звука $c = 2000$ м/с и плотности $\rho = 2000$ кг/м³ и составили $u_{m1} = 57$ мкм/с. Отметим, что $\Delta p_{m1} \approx 2\Delta p_m$, а значение скорости сейсмических колебаний $u_{m1} = 57$ мкм/с значительно больше значения $u_m \approx 5$ мкм/с, измеренного в [10] при ударе молнии на землю. Рассчитанное значение звукового давления $\Delta p_{m1} = 114$ Па в воздухе также превышает измеренные величины. Такое различие можно было ожидать, так как выбранная высокая энергия молнии в расчетах 4200 МДж встречается редко.

ВЫВОДЫ

Предложены критерии моделирования молнии и грома разрядом конденсаторных батарей. Измерены параметры канала и ударной волны при мощных электрических разрядах конденсаторных батарей, выбранных в соответствии с критериями моделирования. Определены тротильные эквиваленты электрических разрядов по результатам измерений параметров ударной волны. На основе модельных исследований оценена энергия молнии по ее фотографии, параметры ударной волны, инфразвуковых и сейсмических сигналов на разных расстояниях. Амплитуды рассчитанных звуковых сигналов значительно выше измеренных на полигоне, что может быть связано с разной энергией молний и состоянием атмосферы.

Автор благодарит академика В. В. Адушкина за постановку задачи и интерес к работе и проф. Ю. И. Зецера за полезное обсуждение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. — М.: Физматлит, 2001.
2. Мучник В. М. Физика грозы. — Л.: Гидрометеиздат, 1974.
3. Александров Г. Н. Молния и молниезащита. — М.: Наука, 2008.
4. Броуд Г. Расчеты взрывов на ЭВМ. — М.: Мир, 1976.
5. Гельфанд Б. Е., Сильников М. В. Барометрическое действие взрывов. — СПб.: Астерион, 2006.
6. Садовский М. А. Геофизика и физика взрыва. — М.: Наука, 1999.
7. Христофоров Б. Д. Влияние свойств источника на действие взрыва в воздухе и воде // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 6. — С. 115–120.
8. Горин Б. Н., Лебедев В. Б., Фельдман Г. Г., Олсен Л. К., Раков В. А. Первый опыт регистрации триггерных и естественных молний с помощью российской электронно-оптической камеры с усилением изображения // VI Рос. конф. по атмосферному электричеству: сб. тр. — Н. Новгород, 2007. — С. 150–153.
9. Цикулин М. А. Воздушная ударная волна при взрыве цилиндрического заряда большой длины // ПМТФ. — 1960. — № 3. — С. 188–193.

-
10. **Санина И. А., Рыбнов Ю. С., Солдатенков А. М. и др.** Сейсмоакустические эффекты при грозовой активности // Геофизика межгеосферных взаимодействий / под ред. В. В. Адушкина. — М.: ГЕОС, 2008. — С. 67–78.

Поступила в редакцию 6/III 2009 г.
